不同坡向雪岭云杉天然更新影响因素分析

王冠正[1,2]， 常顺利[1,2]， 王建萍[1,2]， 张毓涛[2,3]， 孙雪娇[2,3]， 李 翔[2,3]

(1. 新疆大学生态与环境学院绿洲生态教育部重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆天山森林生态系统国家定位观测研究站，新疆 乌鲁木齐 830063；3. 新疆林科院森林生态研究所，新疆 乌鲁木齐 830063)

摘 要：为了解不同坡向环境因子对雪岭云杉林天然更新的影响，在天山北坡中段同一海拔雪岭云杉林的阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡设置系列样方开展调查，构建不同坡向环境因子-更新指数结构方程模型，根据各坡向环境特征分析云杉幼苗存活现状与环境因素间的关系。结果表明：(1) 半阴坡和半阳坡更适宜幼苗的存活和生长，二者更新指数(0.065、0.057)显著高于阴坡和阳坡；(2) 凋落物对雪岭云杉更新有双重作用，凋落物未分解层过厚不利于更新，丰富的有机质可促进土壤形成高氮环境，有利于林下幼苗更新；(3) 不同坡向环境因子对更新指数的作用强度依次为：全氮含量(0.60) > 成年树密度(0.46) > 凋落物半分解层(0.37) > 全钾含量(0.24) > 有机质含量(0.23) > 全磷含量(−0.16) > 速效磷含量(−0.32) > 凋落物未分解层厚度(−0.34)。综合来看，该区域的雪岭云杉幼苗在郁闭度大小为0.6左右，凋落物厚度为2.5 cm左右，土壤全氮、全钾含量较高的半阴坡、半阳坡更新较好。

关键词：雪岭云杉；天然更新；坡向；环境因子；结构方程模型；天山北坡

森林天然更新是一个重要的生态学过程，该过程会涉及植物生命周期的多个阶段，其中，幼苗期对环境的响应最为敏感且死亡率较高[1]。幼苗作为森林后备资源，对群落的发展起着重要作用，在其生长过程中会受到土壤养分[2]、凋落物[3]、光温[4]、林下植物[5]和郁闭度[6]等因素的影响。环境因子影响森林更新过程，各因子间存在复杂关系，其独立与交互作用会直接影响幼苗存活率进而改变林分结构，而环境因子会随着坡向变化而变化，因此，研究不同坡向环境因子与森林更新的关系有利于明晰其作用机制并预测森林未来发展趋势。

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是天山森林优势种，占天山林区面积的90%左右，构成了天山乃至新疆森林生态系统的主体，对林区生态系统的形成和维护起着至关重要的作用[7-8]。近年来，天山北坡中段的雪岭云杉普遍出现了天然更新差、幼苗难成活的现象[9]，经过实地勘察发现，不同坡向的雪岭云杉幼苗有不同的分布特征和年龄构成。有研究表明，不同坡向间的山地即使距离较短，但因坡向的改变也会对幼苗建成具有显著影响[10]。坡向作为重要的地形因子，能够通过影响水热再分配进而影响土壤养分、群落种内和种间竞争，继而干扰植物更新[11]，且坡向对小气候条件的影响还能导致植被的生长和多样性在不同坡向表现出明显的优劣性。森林群落未来发展很大程度上取决于植物所处的环境条件，幼苗更新状况较差的坡向将会破坏该区域整体群落结构，因此，探究不同坡向促进或制约更新的关键因素有助于提升该地区森林更新的成功率。

本研究以天山北坡中段相同海拔梯度上4个不同坡向的雪岭云杉幼苗为研究对象，调查其分布情况、生长情况和年龄结构，对不同坡向的自然条件进行评估，分析了郁闭度、凋落物厚度、土壤理化性质等因子对幼苗更新的影响，旨在探究影响天山北坡中段雪岭云杉天然更新的关键因子，以期能够为改善雪岭云杉天然更新提供理论依据，并制定合理

收稿日期：2023-02-09； **修订日期**：2023-03-17
基金项目：中央财政林业改革发展资金任务“新疆天然林保护工程区森林生态系统服务功能价值评估”；新疆林业生态基础类项目“生态树种新品种选育与生态修复关键技术研究”(XJLYKJ-2021-20)
作者简介：王冠正(1996-)，男，硕士研究生，从事森林生态方面的研究. E-mail：240039126@qq.com
通讯作者：常顺利. E-mail：ecocsl@163.com

的森林管理方案。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆乌鲁木齐县板房沟林场(43°25′~43°26′N,87°27′~87°29′E),海拔1500~2800 m,属温带大陆性气候。年均气温2~3 ℃,历年最高气温为30.5 ℃,历年最低气温为-30.2 ℃,年降水量1134.1 mm,蒸发量544.0 mm,年平均相对湿度65%,最大积雪深度65 cm。森林是以天山雪岭云杉为单优树种的温带针叶林,林下灌木稀少,林木平均胸径约为14.0 cm,平均树高约为11 m,郁闭度为0.6~0.8。林下土壤为灰褐色森林土,土壤发育程度高,剖面分化明显,腐殖质层较厚。

1.2 样地设置与调查

在全面勘察的基础上,于2021年7月13—20日布设样方,选取人为干扰最少、坡位和坡度相似度高、同一海拔梯度上的阴坡、半阴坡、半阳坡、阳坡作为研究样地,各样地间最远水平距离不超过2.5 km。在不同坡向上布设面积为20 m×20 m的样方,每个坡向设置10个样方,共40个样方。利用全球定位系统测量样地的经纬度、海拔、坡向、坡度,并对样地内的乔木进行每木检尺,记录样地内草本层盖度,由于样地内灌木稀少,因此不做记录。将雪岭云杉苗高(H)<20 cm的计为幼苗,20 cm≤H<1.3 m的计为幼树[12],H≥1.3 m的树计为成年树。测量样地内更新幼苗、幼树和成年树的株高,并测量成年树胸径。样地基本情况见表1。

1.3 样品采集与测定

在各样方中选取一条对角线,沿对角线设定3个土壤取样点,每个取样点按照0~20 cm,20~40 cm,40~60 cm将土壤剖面分三层,每层用环刀法测定土壤含水量,同一样方内土壤同层均匀混合,将样品带回实验室自然风干,利用四分法取样磨细并过0.25 mm筛,测定土壤理化性质,包括全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、缓效钾、亚硝酸氮和有机质。其中,土壤含水量采用烘干法测定;全氮采用凯氏定氮仪测定;全磷采用钼锑抗比色法测定;全钾、速效钾和缓效钾采用火焰光度法测定;速效氮采用碱解扩散法测定;亚硝酸氮采用光度法测定;有机质采用重铬酸钾氧化法测定;速效磷采用碳酸氢钠浸提法测定。在每个取样点附近设置50 cm×50 cm的凋落物层样方,测量样方内凋落物未分解层和半分解层厚度。

林分郁闭度通过半球面影像拍摄技术获取,使用单反相机配置搭载鱼眼镜头拍摄样地冠层照片,每个样地的四角和中心均为拍摄点,每个拍摄点至少拍3张照片,拍摄时三脚架离地1 m并避开灌木。最后采用WinSCANOP植物冠层分析系统分析林冠影像并获取数据。

1.4 数据处理

更新指数是评估森林更新情况优劣的指标,其值越大代表林分更新效果越好[13]。本研究基于40块样地实测植被相关指标原始数据,采用熵值法计算更新指数,熵值法目前被广泛用于资源环境保护领域,在确定权重值上有较高的可信度[14],从幼苗的分布状况(单位面积幼苗的数量)、生长情况(幼苗的平均高度)和年龄构成(20 cm≤H<1.3 m的幼树数量占该样方总数量的百分比)3个指标构建更新评价标准。运用R语言中的agricolae包对不同坡向雪岭云杉更新指数、土壤含水量、郁闭度和凋落物厚度及不同土壤理化性质指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并用最小显著差异法(LSD)进行差异性检验(α=0.05)。

先将3个指标的原始数据进行线性变换处理得到如下公式:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{max}} \quad (1)$$

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic information of sampling sites

坡向	平均海拔/m	平均坡度/(°)	成年树数量	幼树数量	幼苗数量	平均树高/m	平均胸径/cm	草本植物盖度/%
阴坡	2156	22	365	521	418	4.48±3.0	6.22±3.0	36.2±6.3
半阴坡	2202	28	518	1320	594	5.44±2.0	6.93±1.9	25.5±8.2
半阳坡	2210	19	439	743	668	3.84±2.4	5.25±3.2	18.1±8.7
阳坡	2185	25	425	410	360	6.08±3.8	8.7±5.2	9.6±6.5

式中：X_{ij} 为各指标去量纲化后数据；x_{ij} 为第j个指标的第 i 个样本数据；x_{max} 为 x_{ij} 对应指标的最大值。

再计算第j个指标的比重(p_j)：

$$p_j = \frac{X_{ij}}{\sum X_{ij}} \quad (2)$$

第j个指标的信息熵(E_j)：

$$E_j = \left(-\frac{1}{\ln_m}\right) \times \left(\sum p_j \cdot \ln_{pj}\right) \quad (3)$$

式中：m为各指标的样本数。

第j个指标的权重(w_j)为：

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum(1 - E_j)} \quad (4)$$

更新指数为：

$$\mathrm{RC} = \sum_{i=1}^{n}\left(w_j \cdot X_{ij}\right) \quad (5)$$

式中：n为评价指标个数，即n=3。

对不同坡向的雪岭云杉更新指数、郁闭度、凋落物厚度、以及全氮、全磷和全钾等9项土壤理化性质指标进行单因素方差分析，并检验各指标之间的差异性(P=0.05)。通过R语言中的corrplot包对各影响因子之间进行相关性分析，通过lavaan包绘制结构方程模型，本研究使用卡方自由度比χ^2/df、拟合优度指数GFI、比较适配指数CFI、增值适配指数IFI以及增进残差均方和平方根RMSEA对模型进行适配性检验，一般认为RMSEA < 0.06，GFI、CFI、IFI > 0.9，χ2/df < 3，则模型拟合良好。

2　结果与分析

2.1　不同坡向雪岭云杉林更新指数

更新指数的大小反映森林更新的优劣，由表2可以看出，不同坡向幼苗更新指数结果有差异，从阴坡到阳坡，更新指数呈现先增加后减少趋势，具体表现为：半阴坡>半阳坡>阴坡>阳坡。4个坡向中，半阴坡森林更新状况最佳，半阳坡次之，阴坡和阳坡森林更新较差。

2.2　不同坡向雪岭云杉林下环境特征

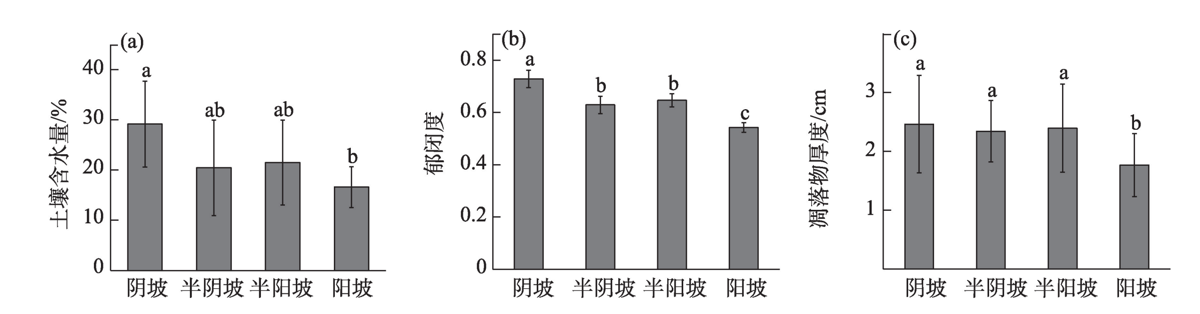
随着坡向由阴坡转向阳坡，土壤含水量整体呈下降趋势(图1a)，其中，阴坡土壤含水量显著高于

表2　更新调查数据标准化、计算参数及更新指数比较

Tab. 2　Regeneration investigation data standardization, calculation parameters and regeneration index comparison

坡向	分布情况	生长情况	年龄结构	更新指数
阴坡	0.168±0.060b	0.368±0.057a	0.0784±0.005b	0.029±0.003b
半阴坡	0.291±0.068a	0.483±0.053a	0.249±0.062a	0.065±0.012a
半阳坡	0.360±0.078a	0.310±0.069b	0.187±0.058a	0.057±0.009a
阳坡	0.152±0.053b	0.344±0.060a	0.066±0.044b	0.026±0.010b
信息熵	0.904	0.9561	0.8761	
变异系数	0.096	0.0439	0.1239	
权重/%	36.40	16.65	46.96	

注：同列不同字母表示差异显著(P < 0.05)。



注：不同小写字母表示不同坡向，雪岭云杉林土壤含水量、郁闭度和凋落物厚度存在显著差异(P<0.05)。

图1　不同坡向雪岭云杉林土壤含水量(a)、郁闭度(b)和凋落物厚度(c)

Fig. 1　Soil water content (a), canopy density (b) and litter thickness under (c) *Picea schrenkiana* plantations with different slopes

阳坡，半阴坡和半阳坡之间含水量基本一致。由图1b可知，阴坡至阳坡郁闭度总体呈下降趋势，阴坡郁闭度显著高于其他坡向，半阴坡和半阳坡显著高于阳坡。由图1c可知，阳坡的凋落物厚度略低于其他坡向，但4个坡向的凋落物厚度无显著差异。

雪岭云杉林下土壤理化性质对坡向变化响应明显（表3）。其中，土壤有机质、全氮和全钾的含量随着坡向由阴坡到阳坡呈现先增加后减少的趋势，前两者在半阴坡和半阳坡的含量均显著高于阴坡和阳坡。土壤中全磷、有效磷和速效钾的含量由阴坡转向阳坡则是表现出先减少后增加的趋势，半阴坡和半阳坡土壤中全磷和有效磷含量显著低于阳坡，速效钾在阴坡和阳坡中的含量显著高于另外2个坡向。阴坡土壤中亚硝酸氮和缓效钾的含量显著高于其他3个坡向，其含量随着坡向由阴坡转向阳坡逐渐降低。林下土壤中，4个坡向速效氮的含量基本相同，表明速效氮的含量并未受到全氮含量的影响。

2.3 环境因子对雪岭云杉林更新指数的影响

不同坡向的环境因子与雪岭云杉更新指数存在一定相关性（图2），在190个变量对中，有48个变量对呈显著相关，其中，呈正相关关系的有24个，负相关关系的有24个。凋落物未分解层厚度与更新系数呈极显著负相关（$P < 0.001$），凋落物半分解层厚度和成年树的胸高断面积与更新指数呈显著正相关（$P < 0.01$），成年树密度与更新指数呈极显著正相关（$P < 0.001$）。在土壤理化性质方面，有机质和全氮含量与更新指数呈极显著正相关（$P < 0.001$），全磷含量与更新指数呈极显著负相关（$P < 0.001$），全钾的含量与更新指数呈显著正相关（$P < 0.01$）。

2.4 结构方程模型的构建

根据相关性分析结果（图2），参考前人就环境因子对森林更新影响的研究[12]，选取成年树密度、郁闭度、凋落物未分解层的厚度、凋落物半分解层的厚度和土壤中有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷的含量等存在显著耦合关系的9项指标进行结构模型的构建（图3）。

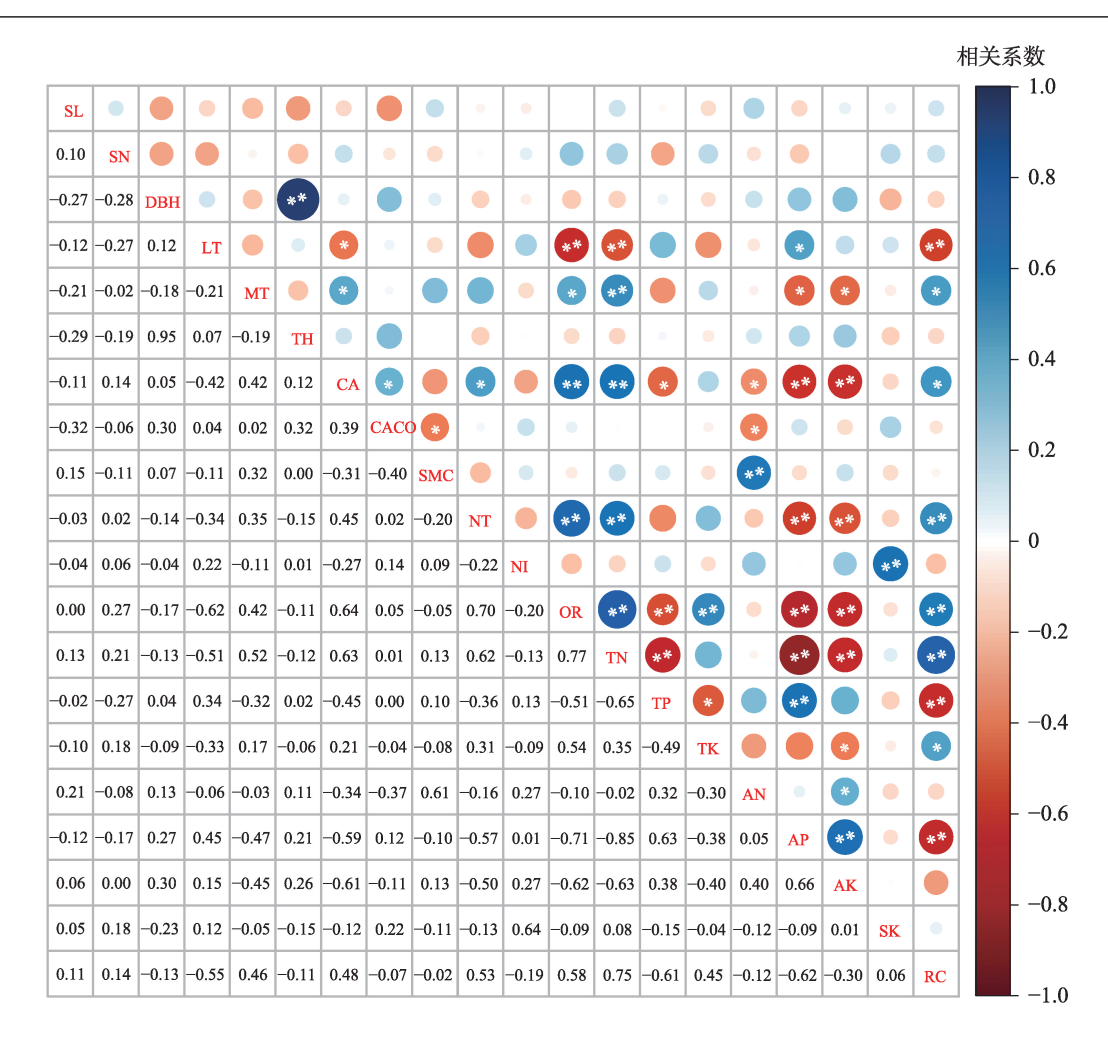
由于本文所得数据符合多元正态分布，所以采用极大似然估计，运用R绘制路径图，并对模型进行分析，模型拟合结果较好，其中χ^2=19.864（P=0.226），χ^2/df = 1.241，GFI等于0.918，CFI = 0.983，IFI = 0.984，RMSEA = 0.076（图3）。对雪岭云杉更新指数的影响因素中，除土壤全氮、全磷、全钾含量和凋落物未分解层厚度外，成年树密度、土壤有机质含量、凋落物半分解层厚度、土壤速效磷含量均存在中介效应（表4）。由表4可见，促进更新的环境因素中，土壤全氮含量对更新指数的影响最大，总影响为0.60，剩余影响因子依次排序为：成年树密度（0.46）、凋落物半分解层的厚度（0.37）、土壤中全钾含量（0.24）、土壤有机质含量（0.23）、土壤中全磷含量（−0.27）、土壤中速效磷含量（−0.32）、凋落物未分解层厚度（−0.34）。其中，有机质含量和土壤速效磷含量对更新指数存在双重作用，且二者的间接影响均大于直接影响。结果表明，在有足够的成年树提供种源的情况下，凋落物半分解层厚度适中，土壤全氮、全钾和有机质含量高的环境条件更适宜雪岭云杉幼苗的存活和生长，而过厚的凋落物未分解层，过高的全磷和有效磷含量会抑制森林的更新进程。

表3 不同坡向雪岭云杉林下土壤理化性质

Tab. 3 Physicochemical characteristics of soil under *Picea schrenkiana* plantations with different densities

土壤理化性质指标	阴坡	半阴坡	半阳坡	阳坡
NI/(mg·kg⁻¹)	0.07±0.01a	0.03±0.01b	0.03±0.01b	0.03±0.01b
OR/(g·kg⁻¹)	71.11±9.67b	97.42±13.40a	94±10.20a	68.51±11.30b
TN/(g·kg⁻¹)	3.17±1.37b	5.33±1.62a	5.08±1.28a	2.10±0.52b
TP/(g·kg⁻¹)	0.71±0.18ab	0.56±0.229b	0.60±0.30b	0.83±0.13a
TK/(g·kg⁻¹)	24.20±2.42a	25.41±1.72a	26.50±2.22a	24.40±3.26a
AN/(mg·kg⁻¹)	336±137a	276±97.60a	293±79.50a	343±93.91a
AP/(mg·kg⁻¹)	7.77±1.36b	6.46±1.86bc	5.91±1.56c	10.10±1.10a
AK/(mg·kg⁻¹)	237±48a	174±28.52b	155±30.30b	266±43a
SK/(g·kg⁻¹)	1560±111a	1280±189b	1130±183bc	1080±155c

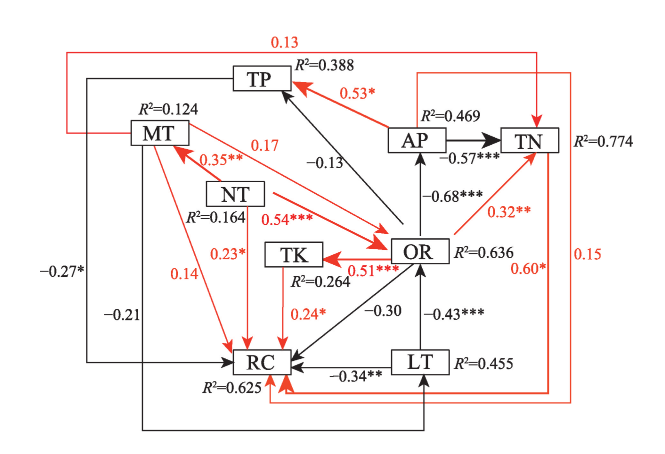
注：不同小写字母表示不同坡向，雪岭云杉林土壤理化性质指标存在显著差异（$P < 0.05$）。NI为亚硝酸氮；OR为有机质含量；TN为全氮；TP为全磷；TK为全钾；AN为碱解氮；AP为速效磷；AK为速效钾；SK为缓效钾。



注:*表示 $P<0.01$;**表示 $P<0.001$。SL为坡度;SN为灌木数量;DBH为胸径;LT为凋落物未分解层厚度;MT为凋落物半分解层厚度;TH为树高;CA为胸高断面积;CACO为胸高断面积增量; SMC为土壤含水量;NT为成年树密度;NI为亚硝酸氮;OR为有机质含量;TN为全氮;TP为全磷;TK为全钾;AN为碱解氮;AP为速效磷;AK为速效钾;SK为缓效钾;RC为更新指数。下同。

图2　更新指数与各环境因子间的相关系数

Fig. 2　Correlation coefficients between regeneration index and environmental factors



注:红色箭头表示正相关的关系,黑色箭头表示负相关的关系,箭头越粗表示影响越大。

图3　结构方程模型路径

Fig. 3　Path map of structure equation mode

表4　环境因子对更新指数的影响

Tab. 4　Effects of environmental factors on regeneration index

因子	直接影响	间接影响	总影响
LT	−0.34	0	−0.34
NT	0.24	0.22	0.46
OR	−0.45	0.69	0.23
TN	0.69	0	0.60
TP	−0.16	0	−0.16
TK	0.24	0	0.24
AP	0.16	−0.48	−0.32
MT	0.14	0.23	0.37

3　讨 论

同一区域不同坡向的水热条件及土壤养分含量有明显差异,坡向通过改变环境因子间接影响雪

岭云杉幼苗的存活和生长。更新指数结果表明,半阴坡和半阳坡的更新状况好于阴坡和阳坡(表2),这可能与郁闭度有着密切关系,卫舒平等[15]指出,适中的林分密度更有利于森林更新,在本研究中,幼苗在郁闭度为0.6左右时出现的频率最高,即半阴坡和半阳坡上的郁闭度大小更适合幼苗生长。种子树为已结实的成年树,幼苗在相对较低的郁闭度下能够获得更多的光照,以加强光合作用积累更多有机物,提升幼苗存活率,而阴坡郁闭度过高(0.72±0.03),即使拥有充足的种子树提供种源,但缺乏幼苗生长所需的光照条件且通风条件较差,因此更新表现并不好,密集的林分环境还可能导致种内存在高竞争强度,导致幼苗养分不足,抑制其生长[16],如果后期通过人工促进更新,可对阴坡进行抚育间伐来调整林分结构,使幼苗能够得到充足的光照和生存空间[17]。雪岭云杉为喜阴树种,其幼苗对光照响应敏感[18],阳坡郁闭度低(0.54±0.01),且光照强烈,过于充沛的光照并不能促进幼苗的存活和生长,相反,光照时间较长导致阳坡土壤水分与肥力不足,幼苗生长所需的全氮、全钾在阳坡的含量较少,这可能也是抑制幼苗生长的因素之一[10]。半阴坡和半阳坡郁闭度相较于前两者较为适中,在不缺乏种源的情况下,既能保证幼苗所需的水热条件又能保证幼苗所需的土壤养分,有助于提高幼苗存活率,改善更新状况。

在采样过程中发现,即使是在半阴坡和半阳坡,密度过高的林分中幼苗数量仍然很少,而林窗下的幼苗数量较多,Drobyshev[19]的研究也表明,林窗是促进云杉更新的重要因素,即成年树数量与更新指数并不是一直保持正相关关系,但图2表明,成年树数量与更新指数始终保持正相关,究其原因,可能是本研究所布设的样方是成年树数量不多但更新较好的区域,此时,成年树尚未对幼苗生长产生较大抑制,主要起种源作用。

4个坡向的凋落物厚度并无显著差异,相关性分析和结构方程模型结果显示,凋落物未分解层对幼苗更新表现出抑制作用,而凋落物半分解层对幼苗更新表现出促进作用。一方面,过厚的凋落物层可能会阻隔种子与土壤接触并释放过多化感物质,导致种子无法萌发[20],另一方面,凋落物分解后能够产生有机质并提供幼苗生长所需水分,因此,凋落物对幼苗更新具有双重作用,即在保证种子萌发的基础上,当凋落物厚度适中时,既能对幼苗生长初期起到一定庇护作用又可防止凋落物过厚而阻挡光照,常雅军等[21]也提出,过厚或过薄的凋落物层会抑制幼苗生长,与本文结果相似。阴坡林分密度较高,凋落物输入增多,厚度大于其他3个坡向。由于光照时长较短,导致凋落物分解减慢,尤其是其中较难分解的木质素部分,凋落物堆积致使养分溶解循环受阻,幼苗生长因此受到抑制[15]。阳坡的光照时间较长、郁闭度较低,大量水分通过蒸散作用流失,无法保证幼苗生长所需水分,且阳坡凋落物厚度在4个坡向中最小,凋落物中主要储水和营养物质的半分解层也会被光照分解[22],水分和营养物质均随之减少,更新进程会因此受到限制。

不同坡向土壤有机质和氮磷钾元素含量呈现规律性变化,土壤养分含量的不均匀分布说明不同坡向的土壤肥力有差异,这将直接影响林分的更新状况。4个坡向中,更新较好的半阴坡和半阳坡全氮含量显著高于阴坡和阳坡,由此推断,土壤中全氮含量可能是限制雪岭云杉生长的主要因素。结构方程模型结果显示,土壤中全氮含量是影响雪岭云杉更新的最主要因素(表4),氮可以提高幼苗的光合效率,表3显示,研究区半阴坡和半阳坡土壤氮含量显著高于阴坡和阳坡,更利于促进森林更新,这与前人研究结果基本一致[23]。土壤有机质对幼苗的建立起到促进作用,一方面,由于土壤有机质多小孔隙,能形成土壤团聚体以促进土壤持水,从而保证幼苗生长所需水分[24],同时,土壤水分的增加能提升根基溶氧量,有助于有机质矿化,提高土壤中氮素的含量。有机质还能通过吸附作用降低土壤的磷含量[25],使幼苗生活在一个低磷的环境中,这对于幼苗生长较为有利,本研究中,阴坡和阳坡土壤的磷含量高于半阴坡和半阳坡,磷含量过高对森林更新产生了负影响,高磷环境下植物根系生长会受到抑制,有研究表明,过量的磷会导致植物气孔关闭,影响光合作用,同时也会抑制植物吸收其他营养元素,不利于养分平衡,易导致植物死亡[26]。钾元素能够促进幼苗生长,在幼苗生长中主要起到渗透调节作用,幼苗早期对钾的需求较高,但在后期幼苗因钾素外泌等现象导致对钾的需求小于氮。

4 结论

本研究以天山中段板房沟林场4个不同坡向的

雪岭云杉为研究对象,运用结构方程模型量化不同坡向各环境变量对幼苗更新的影响,结果表明,半阴坡和半阳坡幼苗更新状况优于其他坡向,即该坡向水热配比更利于云杉生长,云杉林达到了适宜幼苗更新的郁闭度,每年累积的适量凋落物调节了土壤中营养元素的含量及比例,为幼苗生长提供了良好的小生境。因此,在郁闭度过高的阴坡上可通过间伐等措施降低林分密度,以改善林下通风与光照条件,并适当清理过厚的凋落物,便于幼苗向下扎根,在缺乏氮、磷等营养元素的部分坡向人工施肥补充幼苗所需养分。本研究结果明晰了影响天山中段不同坡向雪岭云杉更新的关键因子,有助于针对本研究区实际林分状况进行相应的经营管理,以提高林分更新能力。

参考文献(References):

[1] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林群落结构特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 615−620. [Zhao Weijun, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Analysis on community structure of *Picea crassifolia* forests in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 615−620.]

[2] 杨秀清, 韩有志, 李乐, 等. 华北山地典型天然次生林土壤氮素空间异质性对落叶松幼苗更新的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4656−4664. [Yang Xiuqing, Han Youzhi, Li Le, et al. The effect of heterogeneous spatial distribution of soil nitrogen on regeneration of *Larix principis-rupprechtii* seedlings in typical naturally-regenerated montane forests of Northen China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 4656−4664.]

[3] 陈永富. 森林天然更新障碍机制研究进展[J]. 世界林业研究, 2012, 25(2): 41−45. [Chen Yongfu. Research progress of natural regeneration barrier of forest[J]. World Forestry Research, 2012, 25(2): 41−45.]

[4] 陈圣宾, 宋爱琴, 李振基. 森林幼苗更新对光环境异质性的响应研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 365−370. [Chen Shengbin, Song Aiqin, Li Zhenji. Research advance in response of forest seedling regeneration to light environmental heterogeneity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 365−370.]

[5] 丁易, 臧润国, 杨世彬, 等. 海南霸王岭棕榈植物对热带低地雨林树木更新的影响[J]. 林业科学, 2009, 45(9): 18−23. [Ding Yi, Zang Runguo, Yang Shibin. Effects of palms on trees regeneration in the tropical lowland rain forest of Bawangling, Hainan Island[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(9): 18−23.]

[6] 张志东, 毛培利, 刘玉虹, 等. 林分结构对烟台黑松海岸防护林天然更新的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(8): 2205−2211. [Zhang Zhidong, Mao Peili, Liu Yuhong, et al. Effects of forest structure on natural regeneration of *Pinus thunbergii* coastal shelter forest in Yantai region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(8): 2205−2211.]

[7] Jiao L, Jiang Y, Zhang W, et al. Assessing the stability of radial growth responses to climate change by two dominant conifer trees species in the Tianshan Mountains, Northwest China[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 433: 667−677.

[8] Zhang R, Yuan Y, Gou X, et al. Intra-annual radial growth of Schrenk spruce (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains[J]. Dendrochronologia, 2016, 40: 36−42.

[9] 阿地来·赛提尼亚孜, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山雪岭云杉林群落组成与结构10年动态变化[J]. 生态学杂志 2021, 40(10): 3033−3040. [Adilai Saitiniyazi, Chang Shunli, Zhang Yutao, et al. A decade variation of species composition and community structure of *Picea schrenkiana* forest in Tianshan Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology 2021, 40(10): 3033−3040.]

[10] 陈娟, 张小晶, 李巧玉, 等. 不同坡向川西亚高山林木竞争与叶片表型可塑性的关系研究[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1788−1797. [Chen Juan, Zhang Xiaojing, Li Qiaoyu, et al. Relationships between competition intensity and leaf phenotypic plasticity of woody plants in subalpine forests on different slope directions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(5): 1788−1797.]

[11] 刘旻霞, 马建祖. 甘南高寒草甸植物功能性状和土壤因子对坡向的响应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 74−79. [Liu Minxia, Ma Jianzu. Responses of plant functional traits and soil factors to slope aspect in alpine meadow of South Gansu, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 74−79.]

[12] 张树梓, 李梅, 张树彬, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林天然更新影响因子[J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5403−5411. [Zhang Shuzi, Li Mei, Zhang Shubin, et al. Factors affecting natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba of Hebei, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16): 5403−5411.]

[13] 曾思齐, 甘静静, 肖化顺, 等. 木荷次生林林木更新与土壤特征的相关性[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4242−4250. [Zeng Siqi, Gan Jingjing, Xiao Huashun, et al. Changes in soil properties in regenerating *Schima superba* secondary forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4242−4250.]

[14] 杨锡涛, 周学红, 张伟. 基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7230−7288. [Yang Xitao, Zhou Xuehong, Zhang Wei. Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7230−7288.]

[15] 卫舒平, 梁文俊, 魏曦, 等.不同密度华北落叶松林天然更新及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2023, 33(10): 2687−2694. [Wei Shuping, Liang Wenjun, Wei Xi, et al. Natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations with different densities and its

influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 33(10): 2687−2694.]

[16] 张桥英, 罗鹏, 张运春, 等. 白马雪山阴坡林线长苞冷杉(*Abies georgei*)种群结构特征[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 129−135. [Zhang Qiaoying, Luo Peng, Zhang Yunchun, et al. Ecological characteristics of *Abies georgei* population at timberline on the north-facing slope of Baima Snow Mountain, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 129−135.]

[17] 段劼, 马履一, 贾黎明, 等. 抚育间伐对侧柏人工林及林下植被生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1431−1441. [Duan Jie, Ma Lvyi, Jia Liming, et al. Effect of thinning on *Platycladus orientalis* plantation and the diversity of undergrowth vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(6): 1431−1441.]

[18] 李敏敏, 刘鹏程, 孔维民, 等. 濒危植物澜沧黄杉种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5504−5515. [Li Minmin, Liu Pengcheng, Kong Weimin, et al. Population structure and dynamic characteristics of the endangered *Pseudotsuga forrestii* Craib[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5504−5515.]

[19] Drobyshev I V. Regeneration of Norway spruce in canopy gaps in Sphagnum-Myrtillus old-growth forests[J]. Forest Ecology and Management, 1999, 115(1): 71−83.

[20] 王贺新, 李根柱, 于冬梅, 等. 枯枝落叶层对森林天然更新的障碍[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 83−88. [Wang Hexin, Li Genzhu, Yu Dongmei, et al. Barrier effect of litter layer on natural regeneration of forests: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1): 83−88.]

[21] 常雅军, 曹靖, 李建建, 等. 秦岭西部山地针叶林凋落物层的化学性质[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1308−1315. [Chang Yajun, Cao Jing, Li Jianjian, et al .Chemical properties of litter layers in coniferous forests of western Qinling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(7): 1308−1315.]

[22] 高人, 周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型枯落物层持水性能研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2002, 33(2): 115−118. [Gao Ren, Zhou Guangzhu. A study on water-holding properties of litter layer for various major forest vegetation types in eastern mountainous region in Liaoning Province[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2002, 33(2): 115−118.]

[23] 魏玉龙, 张秋良. 兴安落叶松林缘天然更新与立地环境因子的相关分析[J]. 南京林业大学学报：自然科学版, 2020, 44(2): 165−172. [Wei Yulong, Zhang Qiuliang. Forest edge renewal of *Larix gmelinii* and its response to the environment[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2020, 44(2): 165−172.]

[24] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209−1218. [Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(12): 1209−1218.]

[25] 杨赵, 杨育华, 支国强, 等.不同碳形态有机质对土壤氮磷流失的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S1): 51−54. [Yang Zhao, Yang Yuhua, Zhi Guoqiang, et al. Effect of different carbon sources of organic matter on the soil nitrogen and phosphorus loss[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(S1): 51−54.]

[26] 刘斌, 陈维, 陈伏生, 等. 九连山次生阔叶林幼苗生长对氮磷添加的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2533−2540. [Liu Bin, Chen Wei, Chen Fusheng, et al. Responses of seedling growth in subtropical secondary broad-leaved forest to nitrogen and phosphorus addition in Jiulian Mountain, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2533−2540.]

Factors affecting *Picea schrenkiana* regeneration on different slope directions

WANG Guanzheng[1,2], CHANG Shunli[1,2], WANG Jianping[1,2],
ZHANG Yutao[2,3], SUN Xuejiao[2,3], LI Xiang[2,3]
(1. Key Laboratory of Oasis Ecology under the Ministry of Education, College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Tianshan Forest Ecosystem National Station, Urumqi 830063, Xinjiang, China; 3. Institute of Forest Ecology, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, Xinjiang, China)

Abstract: The influence of different slope-facing environmental factors on the natural regeneration of *Picea schrenkiana* in the middle section of the northern slope of Tianshan Mountains was investigated. A series of plots were established on shady, semishady, semisunny, and sunny slopes at the same altitude, in a *Picea schrenkiana* forest to develop the structure equation model for the regeneration index which uses different slope-facing environmental factors. According to the environmental characteristics of the different slope-facings, the relationship between the survival status of *Picea schrenkiana* seedlings and environmental factors was analyzed. The results showed that the semishady and semisunny slopes were more suitable for the survival and growth of seedlings, and the regeneration indexes of the two slopes (0.065 and 0.057) were significantly higher than those of the shady and sunny slopes. Litter was found to have a dual effect on the regeneration of *Picea schrenkiana*. The undecomposed litter layer was too thick to be beneficial to regeneration, while the rich organic matter could promote the formation of a high nitrogen environment in the soil, which was conducive to the regeneration of seedlings. The influence of different slope-facing environmental factors on the regeneration index was in the order of total nitrogen content (0.60) > adult tree density (0.46) > litter half-decomposed layer (0.37) > total potassium content (0.24) > organic matter content (0.23) > total phosphorus content (−0.16) > available phosphorus content (−0.32) > litter undecomposed layer thickness (−0.34). Overall, the regeneration of *Picea schrenkiana* seedlings in the region was best on the semishady and semisunny slopes with a closure degree of approximately 0.6 and litter thickness of approximately 2.5 cm, as well as high total nitrogen and total potassium contents in the soil.

Keywords: *Picea schrenkiana*; natural regeneration; slope; environmental factors; structural equation model; northern slope of Tianshan Mountains